

# Laserverstärkersystem mit zeitproportionaler Frequenzmodulation

**Patent number:** DE19964083  
**Publication date:** 2001-07-19  
**Inventor:** TUENNERMANN ANDREAS (DE); GRIEBNER UWE (DE); KORN GEORG (DE)  
**Applicant:** FORSCHUNGSVERBUND BERLIN EV (DE)  
**Classification:**  
- **International:** H01S3/23; H01S3/17; H01S3/10; H05H1/46  
- **European:** H01S3/00F1, H01S3/067C, H01S3/23  
**Application number:** DE19991064083 19991227  
**Priority number(s):** DE19991064083 19991227

## Also published as:

WO0148875 (A3)  
 WO0148875 (A2)

## Abstract of DE19964083

The invention relates to a laser amplifier system with time-proportional frequency modulation comprising a laser oscillator, which generates ultrashort pulses, a passive dispersive optical waveguide, which temporally stretches these ultrashort pulses, and at least one double-sheathed fiber, which is doped with active ions and which is provided for amplifying these pulses. The laser amplifier system is also equipped with an optical compressor, which comprises dispersive components and which compresses the stretched pulses that are received from the amplifying double-sheathed fiber. According to the invention, the amplifying double-sheathed fiber is doped with active ions in the core and in the first sheath layer, whereby the dopant concentration of the core is greater than that of the first sheath layer and, in the core, is constant or increases over the length of the fiber in a direction of propagation of the light pulse. In order to form a variable pulse width, the optical compressor is constructed of gratings that are arranged on a metal support, whereby the cooled gratings are designed such that they can be displaced with defined intervals in a computer-controlled manner. The inventive laser amplifier system also comprises a modulator which is provided for adjusting a variable repetition rate and which is arranged between the laser oscillator and the compressor. In one embodiment, passive dispersive optical waveguides and amplifying double-sheathed fibers are integrated in one fiber.

Data supplied from the [esp@cenet](mailto:esp@cenet) database - Worldwide



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

# Patentschrift

## DE 199 64 083 C2

⑮ Int. Cl. 7:  
**H 01 S 3/23**

H 01 S 3/17  
H 01 S 3/10  
H 01 S 3/06  
// (B23K 26/00, H05G  
2:00) H05H 1/46

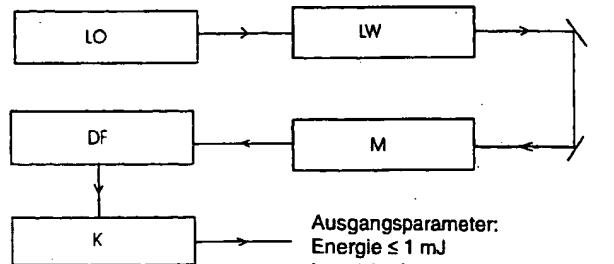
⑯ Aktenzeichen: 199 64 083.1-33  
⑯ Anmeldetag: 27. 12. 1999  
⑯ Offenlegungstag: 19. 7. 2001  
⑯ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 7. 2. 2002

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑯ Patentinhaber:	S. 1315-1317; Optics Letters, Vol. 20, No. 17, 1995, S. 1797-1799; Optics Letters, Vol. 23, No. 23, 1998, S. 1840-1842; Optics Letters, Vol. 21, No. 14, 1996, S. 1061-1063; Optics Letters, Vol. 22, No. 6, 1997, S. 378-380; Electronics Letters, Vol. 10, No. 9, 1974, S. 148-149; Applied Optics, Vol. 14, No. 7, 1975, S. 1538-1542; Optics Letters, Vol. 21, No. 4, 1996, S. 266-268; Optics Letters, Vol. 24, No. 7, 1999, S. 469-471; Optics Letters, Vol. 24, No. 6, 1999, S. 388-390; Optics Letters, Vol. 23, No. 1, 1998, S. 52-54; IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 33, No. 7, 1997, S. 1049-1056; Optics Communications, Vol. 141, 1997, S. 336-342; Optics Letters, Vol. 22, No. 14, 1997, S. 1092-1094; CLEO 1999, Postdeadline Papers, paper CPD10-1; Optical Fiber Sensors (1988), OSA Techn. Dig. Ser. Vol. 2, paper PD5-1; CLEO 1999, Postdeadline Papers, paper CPD11-1; CLEO 1999, Technical Digest, S. 11-12, paper CMC1; Optics Communications, Vol. 132, 1996, S. 474-478;
⑯ Vertreter:	
⑯ Erfinder:	
⑯ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:	
DE 198 28 154 A1 DE 197 17 367 A1 DE 196 20 159 A1 DE 196 19 983 A1 US 51 87 759	
BACKUS, S., u.a.: High power ultrafast lasers. In: Rev.Sci.Instrum., Vol. 69, No. 3, 1998, S. 1207-1223; Optics Communications, Vol. 56, No. 3, 1985, S. 219-221; Science, Vol. 264, 1994, S. 917-924; Applied Physics Letters, Vol. 64, No. 11, 1994,	

⑯ Laserverstärkersystem mit zeitproportionaler Frequenzmodulation

⑯ Laserverstärkersystem mit zeitproportionaler Frequenzmodulation, aufweisend einen Laseroszillator, der ultrakurze Impulse erzeugt, einen passiven dispersionsen Lichtwellenleiter, der diese ultrakurzen Impulse zeitlich dehnt, und mindestens eine mit aktiven Ionen dotierte Doppelmantelfaser zur Verstärkung dieser zeitlich gedehnten Impulse, in die Pumplichtquellen Licht einstrahlen, sowie einen dispersive Gitter aufweisenden optischen Kompressor, der die aus der verstärkenden Doppelmantelfaser austretenden gedehnten Impulse komprimiert, dadurch gekennzeichnet, daß die verstärkende Doppelmantelfaser im Kern und in der ersten Mantelschicht mit aktiven Ionen dotiert ist, wobei die Dotierungskonzentration des Kerns größer ist als die der ersten Mantelschicht und in Ausbreitungsrichtung des Lichtimpulses über die Faserfänge im Kern konstant ist oder zunimmt, der optische Kompressor zur Ausbildung einer variablen Impulsbreite aus auf einem Metallträger angeordneten gekühlten Gittern gebildet ist, wobei die Gitter computergesteuert in definierte Abstände verfahrbar sind, und ein Modulator zur Einstellung einer variablen Folgefrequenz zwischen Laseroszillator und Kompressor angeordnet ist.



Ausgangsparameter:  
Energie ≤ 1 mJ  
Impulsbreite 1 ps bis 100 ps  
Folgefrequenz 1 kHz bis 100 kHz  
Wellenlänge um 1 μm

DE 199 64 083 C2

DE 199 64 083 C2

## Beschreibung

- [0001] Die Erfindung betrifft ein Laserverstärkersystem mit zeitproportionaler Frequenzmodulation, aufweisend einen Laseroszillator, der ultrakurze Impulse erzeugt, einen passiven, dispersiven Lichtwellenleiter, der diese ultrakurzen Impulse zeitlich dehnt, und mindestens eine mit aktiven Ionen dotierte Doppelkernfaser zur Verstärkung dieser zeitlich gedehnten Impulse, in die Pumplichtquellen Licht einstrahlen, sowie einen dispersive Gitter aufweisenden optischen Kompressor, der die aus der verstärkenden Doppelkernfaser austretenden gedehnten Impulse komprimiert.
- [0002] Für eine Vielzahl von technologischen Anwendungen von Kurzpulslaserrstrahlung werden hohe mittlere und hohe Spitzenleistungen benötigt. Ein wesentliches Problem dabei ist, daß zur Erzeugung von Laserstrahlung mit sehr kurzen Impulsen Pumplichtquellen benötigt werden, die eine Inversion des aktiven Lasermediums und damit die Verstärkung ermöglichen. Dieses Pumplicht wird in Lasern typischerweise dann in das aktive Medium eingestrahlt. Bei Verwendung von Pumpquellen hoher mittlerer Leistung entstehen im Lasermedium selbst hohe Temperaturgradienten, die zu einer thermischen Deformation des Mediums führen. Dadurch werden die Strahlungscharakteristika der verstärkten Laserstrahlung wesentlich negativ beeinflußt.
- [0003] Die Verstärkung von kurzen Laserimpulsen in Festkörperlasern zu hohen Spitzenleistungen führt zudem zu extrem hohen Intensitäten im Verstärkermedium. Dadurch verändert sich der Impuls durch nichtlineare optische Effekte. Die wesentlichen Vorgänge sind hierbei die sogenannte Selbstphasenmodulation und Selbstfokussierung. Auch diese Prozesse führen zu einer unerwünschten Veränderung der Parameter der Laserstrahlung. Insbesondere ändert sich die Fokussierbarkeit der Laserstrahlung bzw. können Effekte der Selbstfokussierung zur Zerstörung von teuren Laserkomponenten wie Spiegel oder des Lasermediums selbst führen.
- [0004] Für den optimalen Einsatz von Kurzpulslaserrstrahlung in technologischen Prozessen wie Materialbearbeitung, Medizin und Röntgenemission aus Laserplasmen sind Impulse hoher mittlerer Leistung unterschiedlichster Dauer notwendig. Die Impulsdauern definieren sich aus den jeweiligen Materialien und liegen für eine invasionsfreie Bearbeitung von Festkörpern und medizinischen Gewebe bzw. Zahnen im Bereich von einigen 100 fs bis zu 5 ps. Hierbei ist ein geringer Wärmeeintrag während der Dauer der Einwirkung des Laserimpulses gegeben. Die Impulsbreite sollte deswegen im allgemeinen unterhalb der typischen Elektron-Phononkopplungszeiten von Festkörpern liegen. Dadurch wird ein deterministisches Regime der Abtragung mit sehr hohen Kantenschärfen ermöglicht. Bei der Röntgenerzeugung sind für die Generation eines geeigneten Emissionsspektrums aus Laserplasmen je nach Wellenlänge der zu erzeugenden Röntgenstrahlung Impulse zwischen typisch 5 ps und 10 ns bei entsprechenden Intensitäten im Targetbereich notwendig.
- [0005] Nach dem Stand der Technik wird zur Erzeugung ultrakurzer Impulse extrem hoher Leistung typischerweise die sogenannte chirped-pulse amplification Methode (CPA) verwendet [D. Strickland, G. Mourou, "Compression of amplified chirped pulses", Opt. Comm. 56 (1985) pp. 219–221]. Dabei wird ein ultrakurzer Impuls (typisch 10 fs bis 1000 fs) einer modensynchronisierten Quelle unter Verwendung eines dispersiven Elements im Zeitbereich gestreckt, wodurch dem Impuls eine Frequenzmodulation (Chirp) aufgeprägt wird. Dieser gechirpte (frequenzmodulierte) Impuls kann dann zu hohen Energien verstärkt werden. Dabei ist zu beachten, daß die Spitzenleistung der Impulse nicht Werte überschreitet, die zu unerwünschten nichtlinearen Effekten oder zur Zerstörung des Verstärkungsmediums führt. Nach der letzten Verstärkerstufe wird der Impuls unter Verwendung eines dispersiven Elements (z. B. Gitter, spezielle Faser) komprimiert mit dem Ergebnis hoher Impulsenergie und kurzer Impulsdauer. Impuls-Spitzenleistungen bis in den Bereich einiger Terrawatt bei geringer mittlerer Leitung wurden mit sehr komplexen Systemen demonstriert [M. D. Perry, G. Mourou, "Terrawatt to petawatt subpicosecond lasers", Science 264 (1994), pp. 917–924]. In diesen Systemen werden Bulk-Verstärker (Ti:Sa, Nd:Glas) mit leistungsstarken Arlonen oder Nd:YAG-Lasern bzw. mit Blitzlampen gepumpt. Die Realisierung der entsprechenden Vorrichtungen hierzu erfordert aber sehr kompakte Aufbauten.
- [0006] Durch die Verwendung von Faserverstärkern können die Vorrichtungen in ihrem Aufbau einfacher gestaltet werden. CPA in Fasern wurde bisher in Er-dotierten Singlemode (SM)-Fasern bei Wellenlängen  $\lambda$  um 1,55  $\mu\text{m}$  [M. E. Ferman et al., "All fiber source of 100 nJ subpicosecond pulses," Appl. Phys. Lett. 64 (1994) pp. 1315–1317] und in sogenannten cladding-gepumpten Yb:Er-dotierten Fasern (Impulsenergie: 260 mW, mittlere Leistung: 260 mW) demonstriert [J. D. Minelly et al., "Femtosecond pulse amplification in cladding-pumped fibers," Opt. Lett. 20 (1995) pp. 1797–1799]. Simultane Verstärkung und Kompression in einer Er/Yb-MM-Faser (Kerndurchmesser: 16  $\mu\text{m}$ , Impulsenergie: 2,3 nJ) wurde in einem fs-MOPA System demonstriert [M. Hofer et al., Opt. Lett. 23 (1998) pp. 1840–1842].
- [0007] Im Emissionsbereich um  $\lambda = 1 \mu\text{m}$  sind Faserverstärker mit Nd- und Yb-dotierten Medien (Gläsern) realisiert worden. 100 fs Impulse eines Ti:Sa-Lasers wurden in einem SM Yb-dotierten Faserverstärker (YDFA) bis 12  $\mu\text{J}$  verstärkt [D. T. Walton et al. "Broad-bandwidth pulse amplification to the 10  $\mu\text{J}$ -level in an ytterbium-doped germanosilicate fiber," Opt. Lett. 21 (1996) pp. 1061–1063]. Limitierender Faktor für die erzielbare Impulsenergie ist die Sättigungs-Flußdichte  $F_{\text{sat}}$  (saturation fluence):

$$F_{\text{sat}} = \frac{\hbar v}{\sigma_{12} + \sigma_{21}}, \quad (1)$$

( $\sigma_{12}, \sigma_{21}$  – Emissions- bzw. Absorptionsquerschnitt der Laserwellenlänge). Sie beträgt für Yb-dotierte Fasern (Quarz) ca.  $0,3 \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$ , womit aus einer typischen Singlemode-Faser im Wellenlängenbereich um 1  $\mu\text{m}$  (Kerndurchmesser ~5  $\mu\text{m}$ ) eine Sättigungsenergie von ~15  $\mu\text{J}$  folgt.

[0008] Die notwendigen Faserparameter, die die ausschließliche Ausbreitung des fundamentalen Modes in einer Faser bewirken, können über den sogenannten V-Parameter

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_k^2 - n_m^2} = ka A_n \quad (2)$$

bestimmt werden ( $a$  – Kernradius,  $n_k$  – Brechzahl Kern,  $n_m$  – Brechzahl Mantel,  $A_n$  – numerische Apertur). Ist  $V < 2,405$ ,

handelt es sich um eine Singlemode-Faser. Mit dem Faserparameter V ergibt sich die Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden M in einer MM-Faser näherungsweise zu:

$$M = \frac{4V^2}{\pi^2} \quad (3)$$

[0009] Die höchste bisher berichtete Impulsenergie betrug 160 µJ, erzeugt mit einer SM-Er-Faser, die einen Kern durchmesser von 15 µm besaß [D. Taverner et al., Opt. Lett. 22 (1997) pp. 378–380]. Die numerische Apertur (NA) der Faser betrug 0,07. Eine weitere Erhöhung des Kerndurchmessers erfordert eine weitere Verringerung der NA der Faser, was aber zu einer hohen Sensitivität gegen Krümmungsverluste der Faser führt.

[0010] Um diese Limitierung der SM-Verstärker auszuräumen, kann man zu Multimode-Fasern (MM) übergehen. Der Nachteil von MM-Fasern ist, daß nicht nur der fundamentale Mode geleitet wird, sondern auch höhere Moden ausbreitungsfähig sind, die jeweils unterschiedliche Ausbreitungskonstanten besitzen. Es ist bekannt, daß ein transversales Grundmodesignal in eine MM-Faser eingekoppelt und über Ausbreitungslängen einiger 100 m erhalten bleiben kann [Gambling et al., "Pulse dispersion for single-mode operation of multimode cladded optical fibres", Electron. Lett. 10 (1974) pp. 148–149]. Welche Ausbreitungslängen des Grundmodes in MM-Fasern möglich sind, hängt ganz entscheidend vom Modenkonversionskoeffizient D ab [Gambling et al. "Mode conversion coefficient in optical fibers", Applied Optics 14 (1975) pp. 1538–1542]. D ist ein für jede Faser spezifischer Koeffizient, der beschreibt, in welchem Maße Energie aus dem fundamentalen Mode in höhere Moden umgekoppelt wird und hängt entscheidend von der optischen Qualität der Grenzfläche Kern/Mantel der Faser ab. Da lange Zeit die Qualität seltenerdotierter Fasern unbefriedigend war, konnte nahezu beugungsbegrenzte Emission aus MM-Fasern nur für Fasellängen im Zentimeterbereich realisiert werden [U. Griebner et al., Opt. Lett. 21 (1996) pp. 266–268]. In einem Nd-dotierten Doppelkern-Faserverstärker mit einem Kerndurchmesser von 11 µm wurde aber unlängst ein single-frequency cw-Signal bei  $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$  über eine Länge von 30 m auf 5,5 W ohne merkliche Beeinträchtigung der Strahlqualität verstärkt [I. Zawischa et al., Opt. Lett. 24 (1999) pp. 469–471]. Fasern, bei denen der Modendurchmesser des fundamentalen Grundmodes im Vergleich zur "klassischen" SM-Faser vergrößert ist, bezeichnet man als Fasern mit großem Modenquerschnitt (Large mode area – LMA). Mit einem gütegeschalteten Er-Faserlaser (LMA-Faser, Modendurchmesser: 20 µm) wurden Impulsenergien von 0,1 mJ bei 1 kHz Wiederholrate bei  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  realisiert [R. Paschotta et al., Opt. Lett. 24 (1999) pp. 388–390]. Ein optimiertes Design für passive Stufenindex-MM-Quarzfäsern, hergestellt mit der MCVD-Technik (modified chemical-vapor deposition), führte zu einer SM-Ausbreitungslänge von 23,5 m für fs-Impulse bei  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  (Kerndurchmesser: 45 µm, Claddingdurchmesser: 250 µm, NA = 0,13) [M. E. Fermann, "Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulses", Opt. Lett. 23 (1998) pp. 52–54].

[0011] Die gespeicherte Energie in einem Faserverstärker ist normalerweise durch die ASE (amplified spontaneous emission) limitiert und kann grob als der Quotient von maximalem Gain und der Gain-Effizienz abgeschätzt werden. Er beträgt für Yb-SM-Fasern ca. 26 µJ extrahierbarer Energie, d. h. unwe sentlich mehr als bisher beobachtet [R. Paschotta et al., "Ytterbium-doped fiber amplifier", IEEE J. of Quantum Electron 33 (1997) pp. 1049–1056]. Dieser Wert ist besser als für Neodym aber wesentlich geringer als für Erbium. Kürzlich wurde ein neues Faserdesign demonstriert, das so genannte Ring-Design [P. Glas et al. "A high power neodymium doped fiber laser using a novel fiber geometry", Opt. Comm. 141 (1997) pp. 336–342], welches die Gain-Effizienz reduziert und somit die Energiespeicherfähigkeit erhöht. Mit einem SM-Yb-Faserverstärker, wobei nur der äußere Ring des Kerns dotiert war, konnten Impulse bis zu 69 µJ verstärkt werden [J. Nilsson et al., "Yb<sup>3+</sup>-ring-doped fiber for high-energy pulse amplification", Opt. Lett. 22 (1997) pp. 1092–1094]. Alternativ schlug D. J. Di Giovanni in US 5,187,759 zur Reduzierung der ASE vor, nur den zentralen Bereich des Kerns mit aktiven Ionen zu dotieren, woraus ein höherer Überlapp niedriger Moden mit dem Inversionsprofil resultiert. Durch diese Art der Dotierung wird ein gain-guiding Effekt erzielt, der wiederum den fundamentalen Mode der Faser begünstigt und die ASE in höheren Moden weiter vermindert. Eine Weiterentwicklung dieses Faserdesigns stellt eine LMA-Faser dar, bei der ebenfalls nur der zentrale Teil des Kerns mit aktiven Ionen dotiert ist, jedoch weist zusätzlich das Brechungsindexprofil im Bereich der Dotierung eine leichte Senke auf, so daß eine Art Ringprofil im Kern selbst entsteht. Ein gütegeschalteter Yb-Faserlaser mit diesem Design (Kerndurchmesser: 44 µm, M = 20, Länge: 36 m, 175 µm × 350 µm Pumpcladding, NA = 0,075) generierte Impulsenergien von 2,3 mJ bei 500 Hz ( $\lambda = 1,09 \mu\text{m}$ ), was einer mittleren Leistung von 5 W entspricht, mit einer Strahlqualität von  $M^2 = 3$  [H. L. Offerhaus et al., "Multi-mJ, multi-Watt Q-switched fiber laser" in CLEO '99 Postdeadline Papers (1999), paper CPD10-1].

[0012] Um den Faserstretcher/-verstärker mit Hochleistungslaserdioden pumpen zu können, werden im allgemeinen sogenannte Doppelkernfasern (double-clad fibers) verwendet, die typisch ein Doppelstufen-Brechungsindexprofil besitzen und bei denen die Pumpstrahlung über die Endflächen in das Fasercladding (Pumpcladding) eingekoppelt, in diesem geleitet und über die gesamte Faserlänge (typischerweise einige 10 m) vom Faserkern absorbiert werden [E. Snitzer et al. "Double-clad offset core Nd fiber laser", in Optical Fiber Sensors (1988) OSA Tech. Dig. Ser. vol. 2, paper PD5]. Die bisher höchste cw-Ausgangsleistung eines Faserlasers mit diesem Pumpkonzept wurde von SDL (Spectra Diode Labs) [V. Dominic et al., "110 W Fiber Laser", in CLEO '99 Postdeadline Papers (1999), paper CPD11-1] unter Verwendung einer Yb-double-clad Faser (Modenfelddurchmesser: 9,2 µm, Pumpcladding 170 µm × 330 µm, Länge: ca. 50 m), gepumpt mit 4 Laserdioden je 45 W erzielt. Alternativ zum Doppelstufenindexprofil kann auch eine Doppelkernstruktur durch einen Gradientenindex-Verlauf realisiert werden (s. DE 196 20 159 A1).

[0013] Zur weiteren Leistungsskalierung eines Faserverstärkers und Faserlasers soll neben dem Pumpen über die Endflächen (was die maximale Anzahl möglicher Pumpdioden auf 4 begrenzt) die Anregung transversal durch die Mantelfläche erfolgen. In einer solchen Anordnung wird gleichzeitig die Pumpleistungsdichte auf der Faserendfläche reduziert. Beim transversalen Pumpen werden beispielsweise in die Mantelfläche einer Doppelkernfaser in definierten Abständen V-Nuten eingebracht, welche als Einkoppler für die Breitstreifenpumpdioden dienen (imbedded V-groove coupling – IVGC). Unter Verwendung einer 100 µm Breitstreifendiode mit einer Pumpleistung von 4,5 W wurde mit einer 15 m lan-

gen Yb-dotierten side-cladding gepumpten SM-Faser 3,0 W als Oszillatoren und 3,3 W cw-Ausgangsleistung als Verstärker (90 mW eingekoppelte Leistung) erzielt [L. Goldberg et al. "High efficiency 3 W side-pumped Yb fiber amplifier and laser", in CLEO '99 (1999) Technical Digest, p. 11–12, paper CMC1]. Transversales Pumpen von Doppelkernfasern unter Verwendung von Prismen zur Einkopplung der Pumpstrahlung ist ebenfalls bekannt [Ch. Ghisler et al., Opt. Comm. 132 (1996), pp. 474–478]. Nach dem heutigen Stand der Technik kann mit etwa 4 W Pumpleistung pro 100 µm Diode ( $\lambda = 975$  nm) gerechnet werden, d. h. ca. 100 W Pumpleistung stehen pro Meter Faserränge mit dieser Technik zur Verfügung. Ein weiterer Vorteil transversaler Pumpanordnungen ist die Möglichkeit der Verwendung kleinerer Claddingdurchmesser im Vergleich zum Endpumpen.

[0014] Der Stand der Technik, von dem die Erfindung ausgeht, ist in der DE 196 19 983 A1 beschrieben. Die hier vorgestellte Lösung ist ein Hochleistungs-Verstärkersystem mit zeitproportionaler Frequenzmodulation, das ultrakurze Impulse erzeugt. Das System umfaßt eine gedehnte Impulse erzeugende Quelle, eine Leistungsverstärkerstufe zur Verstärkung der Impulse und einen Kompressor, der die aus der Leistungsverstärkerstufe empfangenen gedehnten Impulse komprimiert. Die Leistungsverstärkerstufe weist eine Doppelmantelfaser und eine Pumplichtquelle auf.

[0015] Die mittleren Ausgangsleistungen der hier beschriebenen Laserverstärker und Faserverstärker sind derzeit für kontinuierliche und gepulste Laserstrahlung auf typisch einige Watt begrenzt. Mit allen vorerwähnten aus dem Stand der Technik bekannten Lösungen sind daher keine hohen mittleren Leistungen und keine hohen Spitzenleistungen in einem Verstärkersystem zu erreichen. Außerdem ist es nicht möglich, die Impulsbreite und die Folgefrequenz einstellen zu können.

[0016] Aufgabe der Erfindung ist es deshalb, ein Laserverstärkersystem mit zeitproportionaler Frequenzmodulation anzugeben, das sich durch geringe Justagefreiheitsgrade auszeichnet, bei dem unerwünschte thermische und nichtlineare Prozesse im aktiven Medium verringert werden und das im Vergleich zum Stand der Technik verbesserte Parameter wie hohe mittlere Leistung und hohe Spitzenleistung der Impulse bei variabel einstellbarer Folgefrequenz und variabel einstellbarer Impulsbreite bei nahezu beugungsbegrenzter Strahlung realisiert.

[0017] Die Aufgabe wird durch ein Laserverstärkersystem der eingangs genannten Art dadurch gelöst, daß erfindungsgemäß die verstärkende Doppelmantelfaser im Kern und in der ersten Mantelschicht mit aktiven Ionen dotiert ist, wobei die Dotierungskonzentration des Kerns größer ist als die der ersten Mantelschicht und in Ausbreitungsrichtung des Lichtimpulses über die Fasellänge im Kern konstant ist oder zunimmt, der optische Kompressor zur Ausbildung einer variablen Impulsbreite aus auf einem Metallträger angeordneten gekühlten Gittern gebildet ist, wobei die Gitter computergesteuert in definierte Abstände verfahrbar ausgebildet sind, und ein Modulator zur Einstellung einer variablen Folgefrequenz zwischen Laseroszillatoren und Kompressor angeordnet ist.

[0018] Um zu einer sehr hohen Spitzen- bzw. mittleren Leistung nach der Verstärkung zu kommen, müssen die Impulse gegebenenfalls vor der Verstärkung auf sehr große Impulsbreiten verlängert werden. Ohne eine entsprechende Verlängerung der Impulse vor Eintritt in die verstärkende Doppelmantelfaser ist die Intensität der verstärkten Strahlung im Kern zu hoch. Das würde zu nichtlinearen Verformungen des verstärkten Impulses bzw. zur Zerstörung des Verstärkermediums führen. Die notwendige Verlängerung kann in einfacher Weise aus der maximalen zulässigen Intensität der Strahlung im Kern abgeschätzt werden. Wenn beispielsweise eine Energie von ca. 1 mJ pro Impuls aus der Faser extrahiert werden soll, darf die Intensität der Strahlung am Ende der verstärkenden Faser nicht über  $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> bis  $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup> liegen. Daraus ergibt sich für einen Kerdurchmesser von typisch 40 µm eine notwendige Impulsbreite von 1 ns bis 10 ns. Bei geringeren Kerdurchmessern der verstärkenden Doppelmantelfaser sind entweder die Impulse weiter zu verlängern bzw. die Energie der Impulse entsprechend zu reduzieren. Diese Impulsbreiten sind mit entsprechenden Stretchern, beispielsweise passiven, dispersiven Fasern – gebildet aus einer langen undotierten Faser –, heute erzielbar. Der im Laseroszillatoren erzeugte breitbandige Impuls mit transversalem Grundmode wird an den fundamentalen Mode der verstärkenden Doppelmantelfaser am Einkoppelende angepaßt. Hierbei kann auch eine Polarisationskontrolle durchgeführt werden, die beispielsweise durch Spannungsdoppelbrechung, die mittels an der Faser angeordneter mechanischer Spannungsvorrichtung erzeugt wird, erfolgt.

[0019] Das in der erfindungsgemäßen Lösung vorgeschlagene Lasersystem garantiert, daß die Verstärkung des fundamentalen Modes bevorzugt und gleichzeitig die Sättigungsenergie erhöht wird. Somit können hohe mittlere Leistungen und hohe Spitzenleistungen der Impulse in der verstärkenden Doppelmantelfaser erzielt werden. Die Dotierung des zentralen Bereichs der verstärkenden Doppelmantelfaser reduziert den Anteil der verstärkten spontanen Emission (ASE) und verstärkt vorzugsweise den fundamentalen Mode (durch zusätzliches gain-guiding des fundamentalen Modes).

[0020] Der gedehnte und verstärkte Impuls wird am Ausgang der Doppelmantelfaser durch einen dispersive Gitter aufweisenden Kompressor komprimiert. Die Impulsbreite läßt sich durch Einstellung des Abstandes der Gitter im Kompressor variieren. Die Gitter sind auf Metallträger aufgebracht. Diese Gitter, vorzugsweise Metall-(Gold-) oder dielektrische Gitter, werden gekühlt, beispielsweise wassergekühlt, und können computergesteuert in definierte Abstände verfahren werden. Die Wahl des Abstandes erfolgt durch die Optimierung des jeweiligen ablaufenden Wechselwirkungsprozesses und ist unterschiedlich für Materialbearbeitung von Festkörpern oder Metallen, medizinische Anwendungen bzw. Röntgenenerzeugung im EUV-Bereich sowie die Erzeugung von frequenztransformierter Strahlung zum Pumpen von anderen Festkörperlasern. Mit den genannten Elementen wird eine Pulskompression ausgeführt, die eine hohe mittlere Leistung des Laserstrahls ohne Verzerrungen der Wellenfront, die durch Aufheizen der Substrate entstehen können, ermöglicht.

[0021] Mittels des zwischen Laseroszillator und Kompressor angeordneten Modulators wird die Folgefrequenz der verstärkten Impulse eingestellt. Dieser reduziert die hohe Folgefrequenz des Oszillators auf die für die jeweilige Anwendung benötigte Frequenz. Der Modulator kann zwischen Laserozillator und passivem dispersiven Lichtwellenleiter (Stretcher) oder zwischen Streicher und verstärkender Doppelmantelfaser oder zwischen verstärkender Doppelmantelfaser und Kompressor angeordnet sein.

[0022] Durch einen zusätzlich angeordneten hochrepetierenden regenerativen Verstärker oder Faservorverstärker kann die Energie des im Laseroszillator erzeugten Impulses auf einige Mikrojoule erhöht werden. Außerdem kann bei der regenerativen Verstärkung ein optimales Spektrum erzeugt werden, das bei einer weiteren Verstärkung zu keiner wesentlichen Veränderung der Pulsdauer am Ausgang des Faserverstärkers führt.

- [0023] Das erfindungsgemäße Laserverstärkersystem ermöglicht die Generierung von kurzen Laserimpulsen mit hoher mittlerer Leistung und hoher Spitzenleistung und unterschiedlich einstellbaren Impulsbreiten für den Einsatz dieser Strahlung in technologischen Prozessen. 5
- [0024] In Ausführungsformen ist vorgesehen, daß die Wirtsmaterialien von Kern- und Mantelschichten der verstärkenden Doppelmantelfaser Gläser oder Polymere sind.
- [0025] Als Dotierungsmaterialien sind Ionen Seltener Erden, vorzugsweise Ytterbium, oder Ionen von Übergangsmetallen vorgesehen.
- [0026] Andere Ausführungsformen betreffen die Ausgestaltung der verstärkenden Doppelmantelfaser. So ist diese zusätzlich in der zweiten Mantelschicht, die auch zur Wellenleitung der Pumpstrahlung verwendet werden kann, mit einem die Laserwellenlänge absorbierenden Material codotiert. Damit kann die entstehende verstärkte spontane Emission weiter reduziert werden. Außerdem dient diese Codotierung auch zur Unterdrückung der Ausbreitung höherer Moden, da diese einen wesentlich höheren Verlust erfahren als der fundamentale Mode. 10
- [0027] Die im Kern über die Länge konstante oder vom Verstärkeranfang zum Verstärkerende hin ansteigende Dotierungskonzentration der Doppelmantelfaser kann ein Stufenindex- oder ein Gradientenprofil aufweisen. Das Pumplicht wird nach der Einkopplung in die verstärkende Doppelmantelfaser bei Beachtung der numerischen Apertur und des Durchmessers der Faser bei der Auslegung der Einkopplungsoptik (Modematching) in dem Wellenleiter geführt. Die Absorption des Pumplichtes pro Einheitslänge ist dabei generell proportional zum Wirkungsquerschnitt der Absorption und der Dichte der aktiven Dotierungsmaterialien (die proportional der Dotierungskonzentration dieser Materialien ist) in der Faser sowie der Pumpleistung. Entsprechend der Pumplichtabsorption stellt sich damit entlang der Faser zusätzlich neben einer inhomogenen Inversionsdichte, die aus der Verringerung der Pumpleistung mit zunehmender Wechselwirkungslänge des Pumplichts mit der Faser resultiert, eine Temperaturverteilung ein, die aus dem Quanteneffekt zwischen Pump- und Laserlicht resultiert. Beide Effekte sind nachteilig, sie führen einerseits zu einem entlang der Faser variierenden Verstärkungskoeffizienten, andererseits zu einer Zerstörung der Faser in Bereichen, in denen die Temperatur der Faser infolge der Pumplichtabsorption die Zerstörschwelle überschreitet. Zur Einstellung einer vorteilhaften einheitlichen (homogenen) Pumplichtabsorption entlang der Faser wird deshalb die Dotierungskonzentration von niedrigen Werten an der Einkoppelstelle auf größere Werte mit zunehmendem Abstand von der Einkoppelstelle eingestellt. Damit wird erreicht, daß sowohl der Verstärkungskoeffizient als auch die Temperatur der Faser homogen entlang der Ausbreitungsrichtung des Lichts ist. Technisch wird dies realisiert, indem eine Preform bereits bei der Faserherstellung mit einem gezielten Dotierungsverlauf hergestellt und dann verzogen wird oder indem Fasern unterschiedlicher Dotierungskonzentrationen zusammengefügt werden. Der Dotierungsverlauf kann dabei kontinuierlich oder in Stufen angepaßt werden. 15
- [0028] Die verstärkende Doppelmantelfaser ist für die im Kern geführte Strahlung als Multimode-Lichtwellenleiter oder als Large Mode Area-Lichtwellenleiter ausgebildet und weist einen großen Kerndurchmesser zwischen  $10\text{ }\mu\text{m}$  und  $100\text{ }\mu\text{m}$  auf. In der erfindungsgemäßen Lösung breitet sich damit ein Single Mode in einer Multimode-Faser aus. 20
- [0029] Die verstärkende Doppelmantelfaser weist Mittel zur Kühlung auf, diese können durch Konvektion oder eine Kühlflüssigkeit realisiert werden, in die die verstärkende Doppelmantelfaser eingetaucht wird. 25
- [0030] Die zusätzliche Ausbildung eines Brechzahlprofils mit Stufenindex- oder Gradientenprofil in der verstärkenden Doppelmantelfaser ist ebenfalls vorgesehen.
- [0031] Der passive, disperse Lichtwellenleiter, der die ultrakurzen Impulse zeitlich dehnt, ist als Singlemode-Lichtwellenleiter ausgebildet. 30
- [0032] Zur weiteren Erhöhung der Ausgangsleistung der Impulse sind bei Vorhandensein mehrerer verstärkender Doppelmantelfasern in dem Verstärkerlasersystem diese in Parallelschaltung in einem Bündel zusammengefaßt bzw. wird deren Strahlung nach Durchgang durch mehrere verstärkende Doppelmantelfasern mittels multichroitischer oder polarisierender Komponenten überlagert. 35
- [0033] In weiteren Ausführungsformen ist vorgesehen, daß die Pumplichtquellen das Licht an den Endflächen (longitudinale Pumpanordnung) oder über die Mantelfläche der verstärkenden Doppelmantelfaser (transversale Pumpanordnung) einstrahlen.
- [0034] Die verstärkende Doppelmantelfaser ist am Ein- und Auskoppelnde zur Reduzierung der Leistungsdichte in ihrem Querschnitt bezüglich des Durchmessers der SM-Faser des passiven Wellenleiters oder der LMA-Faser vergrößert. Dies kann durch das Anspicken einer Faser veränderten Durchmessers oder durch so genanntes Diffusionstapern erfolgen, bei dem die Faser lokal am Ende aufgeheizt wird, was zu einer Veränderung der Dotierungsverläufe im Faserkern-/mantel führt. 40
- [0035] In einer erfindungsgemäßen Ausführungsform ist vorgesehen, passiven dispersiven Lichtwellenleiter und verstärkende Doppelkernfaser in einer Faser zu integrieren, d. h. innerhalb eines CPA-Systems wird die zeitliche Dehnung und die Verstärkung ultrakurzer optischer Impulse in einer Faser durchgeführt. Diese Ausführung verringert weiter die notwendige Justage der einzelnen Komponenten. Innerhalb dieser Faser wird der breitbandige Impuls gestreckt und verstärkt unter Beibehaltung seiner beugungsbegrenzten Strahleigenschaften, d. h. es erfolgt nahezu keine Umkopplung in höhere transversale Moden. Dies wird erreicht durch das bereits erwähnte Faserdesign, das Modenkonversion und Perturbationen der Faser minimiert. 45
- [0036] Zur Ausbildung einer variablen Folgefrequenz ist der Modulator vorzugsweise zwischen dem passiven dispersiven Lichtwellenleiter und der verstärkenden Doppelmantelfaser bzw. in dem Falle, wenn in eine Faser passive disperse Lichtwellenleiter und die verstärkende Doppelmantelfaser integriert sind, zwischen dem Laseroszillator und dieser Faser angeordnet. Der Modulator kann ein akustooptischer Modulator sein oder ist in den passiven Lichtwellenleiter integriert. 50
- [0037] Weitere Einzelheiten der Erfindung und ihrer vorteilhaften Ausführungsformen werden im Zusammenhang mit der folgenden Beschreibung der Figur näher erläutert. 55
- [0038] In der Figur ist schematisch ein Blockschaltbild des erfindungsgemäßen Laserverstärkersystems dargestellt.
- [0039] Der im Laseroszillator LO erzeugte Impuls (von  $100\text{ fs}$ ) wird zunächst in einem dem Stand der Technik nach

bekannten Lichtwellenleiter LW (lange undotierte Faser wirkt als "Stretcher") durch Selbstphasenmodulation dispersiv auf eine Impulsbreite von über 1 ns verlängert. Über Strahleiter werden diese gedehnten Impulse einem Modulator M zugeführt, mittels dem die Folgefrequenz eingestellt werden kann. In der sich anschließenden verstärkenden Doppelmantelfaser DF, bestehend aus Quarzglas ( $n_k = 1,41$ ), die das im folgenden beschriebene Design aufweist, wird der gedehnte Impuls unter Beibehaltung seiner beugungsbegrenzten Strahleigenschaften des fundamentalen Modes verstärkt.

[0040] Der Faserkern mit einem Durchmesser von 50 µm ist mit 2000 ppm Yb<sup>3+</sup>-Ionen dotiert. Der erste Mantel mit einem Durchmesser von 300 µm ist ebenfalls mit Yb<sup>3+</sup>-Ionen aber geringerer Dotierung von 100 ppm im Vergleich zum Kern zur Erhöhung der Verstärkung ausgestattet. Der mit Sm-dotierte 2. Mantel mit einem Durchmesser von 400 µm, welcher anstelle Quarzglas auch als Polymer ausgebildet sein kann, dient zur Absorption der höheren Moden der Laserstrahlung und Verbesserung der Single-Mode Ausbreitung in der LMA-Faser. Die zu wählenden Brechzahlverhältnisse zwischen Kern und erstem Mantel - um die Ausbreitung des transversalen Grundmodes in der Faser zu realisieren - ergeben sich aus Gleichung (2). Aus Gleichung (3) wird ermittelt, wieviel höhere Moden für das gewählte Design ausbreitungsfähig sind. Die Einstellung des Brechzahlverhältnisses erfolgt über die geeignete Wahl der Glaszusammensetzung des Wirtsglasses Quarz.

[0041] Im Kompressor K, der aus einem Paar parallel angeordneter Reflexionsbeugungsgitter, die auf wassergekühlten Metallträgern aufgebracht sind, besteht, werden die gestreckten und verstärkten Impulse komprimiert. Der Kompressor liefert Impulse mit folgenden Parametern: Energie bis 1 mJ; Impulsbreite 1 ps bis 100 ps; Folgefrequenz von 1 kHz bis 100 kHz bei einer Wellenlänge um 1 µm.

[0042] Um die Zerstörschwelle der Faser am Ein- und Auskoppelende zu reduzieren, kann diese mit einem Taper ausgestattet sein. Die Faser ist in Steckern gehalten, deren Endflächen antireflex beschichtet oder unter einem Winkel (typisch 4°) gefertigt sind, um Reflexionen an den Endflächen zu vermeiden.

[0043] Das beschriebene Faserdesign eignet sich für eine longitudinale und transversale Pumpgeometrie der verstärkenden Doppelmantelfaser, wobei die Anregung gepulst oder kontinuierlich erfolgen kann. Eine Kontrolle der Polarisierung der zu verstärkenden Strahlung kann durch geeignete Formung des Faserkerns (z. B. nicht zirkular) oder durch Spannungsdoppelbrechung erreicht werden.

## Patentansprüche

1. Laserverstärkersystem mit zeitproportionaler Frequenzmodulation, aufweisend einen Laseroszillator, der ultrakurze Impulse erzeugt, einen passiven dispersiven Lichtwellenleiter, der diese ultrakurzen Impulse zeitlich dehnt, und mindestens eine mit aktiven Ionen dotierte Doppelmantelfaser zur Verstärkung dieser zeitlich gedehnten Impulse, in die Pumplichtquellen Licht einstrahlen, sowie einen dispersive Gitter aufweisenden optischen Kompressor, der die aus der verstärkenden Doppelmantelfaser austretenden gedehnten Impulse komprimiert, dadurch gekennzeichnet, daß
2. die verstärkende Doppelmantelfaser im Kern und in der ersten Mantelschicht mit aktiven Ionen dotiert ist, wobei die Dotierungskonzentration des Kerns größer ist als die der ersten Mantelschicht und in Ausbreitungsrichtung des Lichtimpulses über die Faserlänge im Kern konstant ist oder zunimmt, der optische Kompressor zur Ausbildung einer variablen Impulsbreite aus auf einem Metallträger angeordneten gekühlten Gittern gebildet ist, wobei die Gitter computergesteuert in definierte Abstände verfahrbar sind, und ein Modulator zur Einstellung einer variablen Folgefrequenz zwischen Laseroszillator und Kompressor angeordnet ist.
3. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Wirtsmaterialien von Kern- und Mantelschichten der verstärkenden Doppelmantelfaser Gläser sind.
4. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Wirtsmaterialien von Kern- und Mantelschichten der verstärkenden Doppelmantelfaser Polymere sind.
5. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die zweite Mantelschicht der verstärkenden Doppelmantelfaser mit einem die Laserwellenlänge absorbierenden Material codotiert ist.
6. Lasersystem nach einem der vorgehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die aktiven Ionen für die Dotierung Ionen Seltener Erden sind, vorzugsweise Ytterbium-Ionen.
7. Lasersystem nach einem der vorgehenden Ansprüche, 7 dadurch gekennzeichnet, daß die aktiven Ionen für die Dotierung Ionen von Übergangsmetallen sind.
8. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die verstärkende Doppelmantelfaser ein Brechzahlprofil mit Stufenindex- oder Gradientenprofil aufweist.
9. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Kerndurchmesser der verstärkenden Doppelmantelfaser zwischen 10 µm und 100 µm groß ist.
10. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der passive, dispersive Lichtwellenleiter, der die ultrakurzen Impulse zeitlich dehnt, als Singlemode-Lichtwellenleiter ausgebildet ist.
11. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die verstärkende Doppelmantelfaser als Multi-mode-Lichtwellenleiter für die im Kern geführte Strahlung ausgebildet ist.
12. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die verstärkende Doppelmantelfaser als Large Mode Area-Lichtwellenleiter für die im Kern geführte Strahlung ausgebildet ist.
13. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die verstärkende Doppelmantelfaser Mittel zur Kühlung aufweist.
14. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere verstärkende Doppelmantelfasern in Parallelschaltung in einem Bündel zusammengefaßt sind.
15. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlung nach Durchgang durch mehrere verstärkende Doppelmantelfasern mittels multichroitischer oder polarisierender Komponenten überlagert ist.

# DE 199 64 083 C 2

16. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumplichtquellen das Licht an den Endflächen der verstärkenden Doppelmantelfaser einstrahlen. 5
17. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumplichtquellen das Licht über die Mantelfläche der verstärkenden Doppelmantelfaser einstrahlen.
18. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die verstärkende Doppelkernfaser am Ein- und Auskoppelende in ihrem Durchmesser vergrößert ist. 10
19. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der passive dispersive Lichtwellenleiter und die verstärkende Doppelkernfaser in einer Faser integriert sind.
20. Lasersystem nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulator zwischen dem Laseroszillator und der Faser, in die der passive dispersive Lichtwellenleiter und die verstärkende Doppelmantelfaser integriert sind, angeordnet ist. 15
21. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulator zwischen dem Laseroszillator und dem passiven dispersiven Lichtwellenleiter angeordnet ist.
22. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulator zwischen dem passiven dispersiven Lichtwellenleiter und der verstärkenden Doppelmantelfaser angeordnet ist. 20
23. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulator zwischen der verstärkenden Doppelmantelfaser und dem Kompressor angeordnet ist.
24. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulator ein akusto-optischer Modulator ist.
25. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulator in den passiven Lichtwellenleiter integriert ist. 25

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

30

35

40

45

50

55

60

65

